

Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése

KISZELY MÁRTA & GYŐRI ERZSÉBET

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, kiszely.marta@csfk.mta.hu; gyori.erzsebet@csfk.mta.hu

A földrengéskutatásban rendkívül fontos a mesterséges szeizmikus események elkülönítése a tektonikai folyamatokból származóktól. Jelen dolgozat a Mátra második legmagasabb csúcsán elhelyezett pizskéstetői szeizmológiai állomáson (PSZ) detektált bányarobbantások és az Északi-középhegység és Szlovákia déli területén kipattant földrengések jellemző paramétereit elemzi. A PSZ állomás 8 bánya robbantásait regisztrálja rendszeresen, a terület szeizmikus aktivitása pedig a 2013. év elején jelentősen megemelkedett az $M_L4,8$ hevesi és az $M_L4,2$ érsekivadkerti rengések, és az azokat követő számos utó rengés miatt. A dolgozatban a szeizmikus események időbeli eloszlását, hullámforma és spektrális tulajdonságait elemeztük.

M. KISZELY, E. GYŐRI: Comparative analysis of earthquakes and explosions occurred in the Northern Mountains, Hungary and the southern part of Slovakia

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Seismological Observatory, kiszely.marta@csfk.mta.hu; gyori.erzsebet@csfk.mta.hu

It is very important to separate the tectonic earthquakes from artificial seismic events in seismology. The present study analyzes the characteristics of earthquakes and blasts of quarries occurred in Northern Mountain, Hungary and Slovakia that were detected in the seismological station Pizskéstető (PSZ). The PSZ station detects regularly the nearby microearthquakes and blasts originated from 8 different quarries. The natural seismic activity is significantly increased at the beginning of year 2013, when an $M_L4,8$ earthquake shocked the region of Heves, and $M_L4,2$ occurred at Érsekivadkert. These mainshocks were followed by many aftershocks. We analyzed the temporal distribution, the waveform and spectral properties of these seismic events.

Bevezetés

Történelmileg a különböző atomcsend egyezmények ellenőrzése miatt építették ki az 1960-as években a Nemzetközi Standardizált Mérőállomás Hálózatot (Worldwide Standardized Seismograph Network, WWSSN), amit egységesített műszerekkel szereltek fel. Ekkor kezdődött a különböző elkülönítési módszerek kidolgozása, amik lehetővé tették a nukleáris robbantások kiszűrését a földrengések közül. Az atomrobbantások kivitelezési technikájának finomodása miatt – mivel szerették volna őket eltitkolni – már egyre kisebb méretű szeizmikus jeleket kellett elemezni, ami a mérőállomások számának gyarapodását és azok érzékenységeinek növelését eredményezte. A nemzeti hálózatok kiépülésével pedig már nemcsak az atomrobbantások és a nagyobb földrengések, hanem a kisebb ipari és bányarobbantások is a földrengésektől származó jelek közé kerültek, azok kiszűrése is szükségessé vált.

Magyarország területén is bővült a jó minőségű állomások száma (jelenleg, 2013 novemberében 12 állomás működik az MTA CSFK GGI keretében), így a detektált események között egyre több az olyan mikro rengés, amely már beleesik a bányarobbantások mérettartományába. Több olyan terület is van hazánkban, ahol robbantásos bányaművelés és természetes szeizmikus aktivitás egyszerre van jelen. Ezek pl. a Vértes területe, a Börzsöny és a Mátra környéke. A robbantások helyét és idejét azonban sokszor nem ismerjük, vagy a bányakapitányságoktól kapott információkat csak hetek múlva lehet elérni. Ezért robbantások

is bekerülhetnek a katalógusba földrengésként, ami téves tektonikai következtetéseket, a földrengés-veszélyeztetettség téves megítélését vonhatja maga után.

Hazánkban is szükségessé vált a robbantások és a mikrorengések jellemzőinek elemzése, hogy a kapott eredmények segítséget nyújtsanak a továbbiakban a mesterséges szeizmikus események kiszűrésére. Ez nagyon fontos például Budapest szeizmikus kockázatának elemzésénél is.

Jelen dolgozatban az elemzésre kiválasztott terület a Mátra környéke volt, ugyanis a Mátra tágabb környezete állandó szeizmikus aktivitást mutat. 2013-ban az $M_L4,8$ hevesi és az $M_L4,2$ érsekvadkerti, kisebb károkat okozó rengések és azok számos utórengése miatt megemelkedett a katalógusba került szeizmikus események száma (Grácz et al. 2012, 2013.). A Piskéstetőn (a Mátra második legmagasabb csúcsán) működő (PSZ) szeizmológiai állomás rendszeresen detektálja – a távolabbi nagyobb rengések mellett – a környék mikrorengéseit, valamint a Mátrában és a Szlovákia déli részén működő kőbányák robbantásait.

Elemzésünk során az időpont, hullámforma adatok és spektrum jellegzetességek alapján elemeztük a PSZ állomás által detektált bányarobbantásokat és közeli földrengéseket. Összesen 204 eseményt vizsgáltunk, aminek a fele volt robbantás, fele földrengés. Azt vártuk, hogy az egy bányából származó robbantások szeizmogramjai hasonlóak lesznek, mivel a szeizmikus hullámok által átszelt út a forrás és állomás között ugyanaz, és sikerül az ugyanabból a bányából származó robbantásokat azonosítani. A spektrumok elemzésével pedig a bányarobbantások esetében alkalmazott késleltetett robbantási módszer kimutathatóságát kerestük.

A cikkben először a bányarobbantások leggyakrabban használt elkülönítési módszereit mutatjuk be, majd az elemzésben érintett bányákat ismertetjük. A felhasznált robbantások és földrengések paramétereit két táblázatban foglaljuk össze. Végül a listában közölt hazai robbantások és földrengések esetére kapott eredményeket ismertetjük.

Az elkülönítés módszerei

A megfigyelések szerint, ugyanabban a bányában végzett robbantások szeizmogramjai nagyon hasonlóan egymásra, illetve a robbantások szeizmogramjain felismerhetők olyan ismertető jegyek, amik arról árulkodnak, hogy nem földrengésből származtak. Ilyen például az, hogy az S hullámok kevésbé dominálnak, R_g hullámok jelennek meg a regisztrátumon, az első beérkezés iránya pedig kompressziós. Ha egy szeizmikus esemény hasonlít valamely ismert bánya korábbi robbantásához, akkor ez is támpontot ad azonosítására. Az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) ezek alapján egy döntési protokollt állított fel a földrengések és a robbantások gyors kiszűrésére.

Javaslatuk 5 alappilléren nyugszik.

1. **HELYSZÍN:** sok esetben köthető egy működő bányához egy ahhoz közeli esemény, főleg akkor, ha hasonló méretű események ott rendszeresen előfordulnak.
2. **IDŐPONT:** a bányák általában hétköznapi, hasonló napszakban, munkaidőben végeznek robbantásokat. A kerek óra időpont is árulkodó lehet.
3. **HULLÁMFORMA:** ugyanabban a bányában végzett robbantásoknak ugyanazon állomáson detektált hullámformái nagyon hasonlóak lesznek. Mivel egy robbantás felszíni esemény, jellemző az erős felszíni R_g hullám, és a robbantás izotróp jellege miatt nem alakul ki, vagy nem túl erős az S nyíró hullám. A spektrumban pedig megjelenik a késleltetett robbantási technika nyoma.
4. **HATÁSA:** az eseményt nem jelzi „érezhetőnek” a lakosság, pedig a számított magnitúdó alapján olyan földrengés történt, amit a közeli településeken érezhettek volna, és jelenteni szoktak, de nem tették.

5. BÁNYÁK BEJELENTÉSE: sok esetben rendelkezésre áll a bányakapitányságoktól kapott független robbantási információ.

A lista alapján egy szeizmikus esemény besorolását leggyorsabban a helye alapján lehetne eldönteni. Ha az epicentrum egy működő bánya területére esett, akkor valószínűleg robbantás történt. Sok helyen azonban a bányaművelés tektonikailag aktív területre esik, ráadásul az epicentrum meghatározása akár 10 km-es hibával is terhelt, így nem egyértelmű a besorolás. A beérkezett jelek időpontja is kevés önmagában az esemény osztályozására, mert földrengések keletkezhetnek természetesen a bányaművelés aktív óráiban is.

Ugyanannak a bányának a robbantásai nagyon hasonló szeizmikus hullámokat keltenek. Általános megfigyelés az is, hogy egy nagyobb rengést követő utórengések is rengésrajokat, „klasztereket” alkotnak (Massa et al. 2006; Hage és Joswig 2009), ami egymáshoz nagyon hasonló események csoportját jelenti (Aster és Scott 1993). Jellemzők még a páros események, „dublettek”, amik szinte teljesen egyformák, és gyakran másodperces vagy órás késéssel követik egymást. Baisch és munkatársai (2008) szintetikus szeizmogramok elemzésével bebizonyították, hogy a közel egyforma hullámformájú rengések hipocentrumai nagyon közel helyezkednek el egymáshoz képest, gyakorlatilag 100–200 m-re. Ezt a távolságot a szeizmogram jellemző hullámhosszának a negyedére becsülték, ez az ún. „ $\lambda/4$ ” kritérium. A hullámforma nagyfokú hasonlóságát a közeli epicentrumon kívül a nagyon hasonló fészekmechanizmus okozza (Deichmann és Garcia-Fernandez 1992).

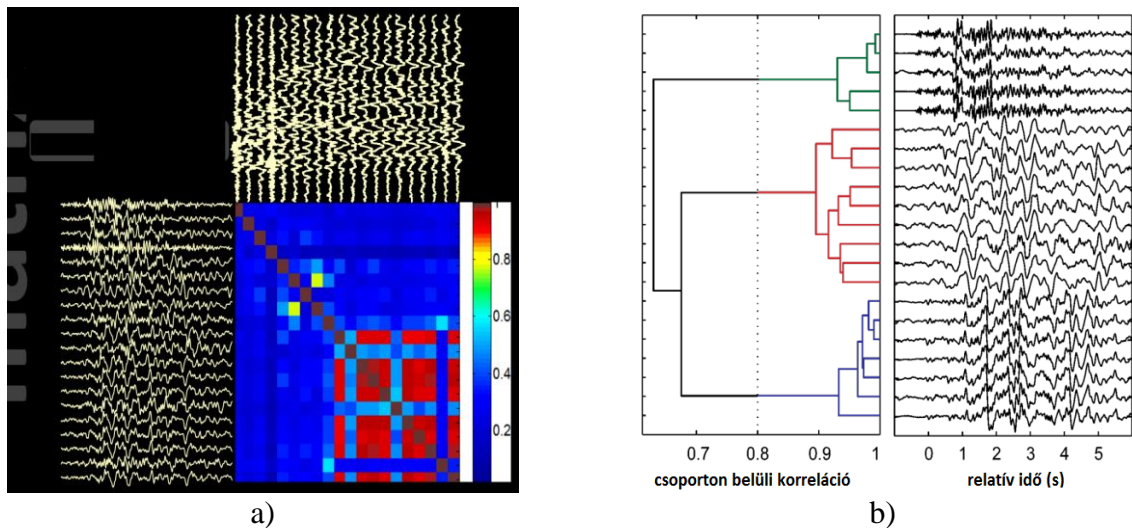
Két hullámforma közötti hasonlóság a c_{xy} keresztkorrelációs együtthatóval jellemezhető:

$$c_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N W_x(t_i) W_y(t_i + \tau_{xy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N W_x(t_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N W_y(t_i + \tau_{xy})^2}}$$

ahol W_x és W_y a két szeizmogram elemei az idő függvényében, maximum N mintával eltolva, τ_{xy} a maximális c_{xy} értékéhez tartozó eltolási idő. A kritikus c_{xy} korrelációs együttható értékét – ami fölött hasonlóknak tekintenek két hullámformát – általában 0,6-0,95 között szokták megadni. Az alsó érték egy gyenge, az 1-hez közeli erős hasonlóságot jelent. Közeli kis eseményeknél az N mintaelemek száma a beérkező hullám időtartamának (általában 6-30 sec) és a mintavételi időnek a függvénye.

Ha sok esemény egymáshoz képesti hasonlóságát vizsgáljuk, az eredmény egy keresztkorrelációs mátrix (1.a. ábra), ahol a főátlóban azok a keresztkorrelációs együtthatók láthatók, mikor önmagával hasonlítottuk össze az eseményt, így értékük 1.

Az események közötti hasonlóság, mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba, csoportokba rendezhetők, amit *dendrogramnak* nevezünk (1.b. ábra). A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával. Pechmann és Kanamori (1982) kimutatták, hogy vannak „erős párok” amelyeknek a forrásai szinte egybeesnek, és „gyenge párok”, ahol bár a fészekmechanizmus nagyon hasonló, távolabb esnek a fészkek egymástól. Ekkor a szeizmogramok főleg a nagyfrekvenciás tartományban különböznek. Ha két esemény hullámformája eltér, az nemcsak azzal magyarázható, hogy epicentrumaik távol vannak egymástól, hanem azok eltérő fészekmechanizmusával is.



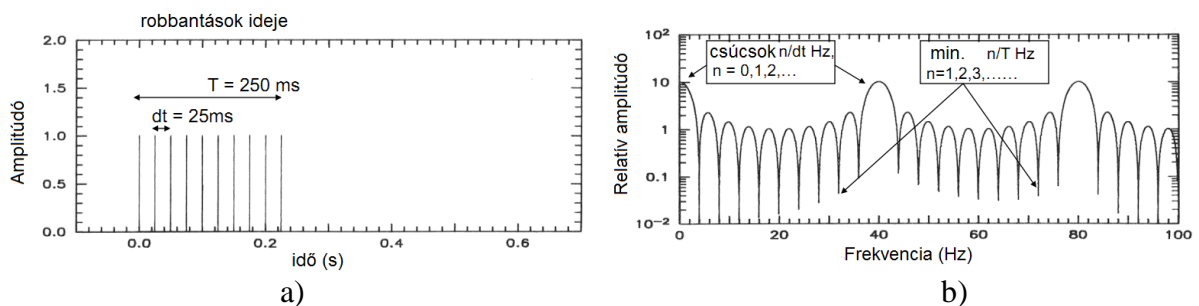
1. ábra. A hullámforma korreláció elemzés eredményének kétféle grafikus megjelenítése: a) kereszt-korrelációs mátrix és b) a dendrogram

Figure 1. Two graphical representations of the results of waveform correlation analysis: a) the cross-correlation matrix and b) the dendrogram

A hazai kőbányák a késleltetett robbantási módszert (*ripple-firing*) alkalmazzák, aminél négyzettrácsos szerkezetben, néhány milliszekundumos időkülönbséggel (*delay*) egymás után robbantják fel a felszín alatt 1-2 m-re lefűrt tölteteket. Az ilyen technikájú robbantások forrás-idő függvénye az egyedi robbantások lineáris szuperpozíciója lesz. Az egyes robbantások keltette hullámok között konstruktív illetve destruktív interferencia alakul ki, így a spektrumban bizonyos frekvenciákon megnő, másokon lecsökken az energia, a spektrum „csipkézett” lesz.

A spektrum moduláció matematikai hátterét Gitterman és munkatársai vezették le (Gitterman et al. 1993). A spektrum szerkezetét három fő paraméter határozza meg: az egy sorban elhelyezett töltetek közötti és a sorok közötti késleltetési idők, valamint az összes töltet felrobbantásának teljes időtartama (2.a. ábra). A robbantások spektrumának vizsgálata így lehetőséget ad a földrengésektől való elkülönítésükre.

A spektrumok elemzése a késleltetett robbantási technika nyomának a kimutatását célozta.



2. ábra. A csipkézett spektrum keletkezése egysoros késleltetett robbantás esetén: a) töltetek felrobbantásának teljes időtartama és a késleltetési idők, b) a spektrum csúcsok és minimumok (Chapman et al. 1992 nyomán)

Figure 2 The origin of spectral scalloping in case of single row explosions: a) the full time of charges and the delay time, b) the spectral minima and maxima (Chapman et al. 1992)

A *bináris spektrum* révén a megemelt energiájú sávok időbeli függetlenségét elemezhetjük. A cél az időtől független spektrum modulációk felerősítése és a véletlenszerű összetevők kiejtése. Földrengésekre ez az időtől független moduláció nem jellemző. A módszert szeizmológiai célra Hedlin és munkatársai (1989) fejlesztették ki. Carr és Garbin (1998) az 1990 és 1992 között az Egyesült Államok Wyoming területén történt földrengések és késleltetett robbantások bináris spektrumát elemezte. Az állomások mintavételi ideje lehetővé tette (100 Hz), hogy 50 Hz-ig kövessék a spektrumokat. A robbantások 50%-ában sikerült a spektrumban a sávokat kimutatni, 22%-ban kialakultak sávok, de azok nem voltak stabilak, míg a többi esetben nem vezetett sikerre a módszer.

A földrengések és a robbantások fészekmechanizmusukban is különböznek egymástól. A robbantások izotróp hullámforrásoknak tekinthetők, amikor minden irányban szinte azonos erősségű kompressziós, azaz nyomáshullámok indulnak el. A tektonikus eredetű földrengések esetében viszont főként nyírási deformációk jönnek létre, a felszabaduló energia nagyobb része *S* hullámok formájában terjed tovább. A detektált hullámok amplitúdója pedig függ a törési sík és az azon történő elmozdulás irányától. Ez a magyarázata annak, hogy a *P/S* amplitúdó arány nagyobb lesz robbantások esetén. Így ez egy általánosan használt paraméter a földrengések és robbantások elkülönítésére (pl. Kim et al. 1998; Koch és Fäth 2002).

Az *P/S* amplitúdó arány értéke területenként változhat, függ a vizsgált frekvencia sávától, a felhasznált fázisoktól (*P_g*, *P_n*, *S_g*, *S_n*, *L_g*) és a terjedési úttól. Bizonyos körülmények között azonban a *P/S* amplitúdó arány robbantások esetében kisebb is lehet a földrengésekénél. Az arányok számítására az 1980-as években még csak az 1 Hz körüli, szélsávú hullámforma adatokat használták fel. Baumgardt és Young (1990), valamint Kim és munkatársai (1993) nagyobb, 5 Hz-ig terjedő frekvenciákra is kiterjesztették számításaikat. Tapasztalataik szerint ebben a sávban jobb elkülönülést kaptak, mint alacsonyabb frekvenciák esetében.

Robbantásokra és a sekély fészekmélységű földrengésekre jellemző az *R_g* hullám kialakulása. Ez egy felületi hullám típus, ami a térhullámokkal ellentétben éles beérkezés nélküli, hosszan kiterjedő hullámvonulatot alkot. Az *R_g* rövidperiódusú Rayleigh-hullámokból áll, spektruma általában 0,66–2 Hz között maximális. Jelölésében a „g” a kéreg gránitos részére utal, ahol terjedése történik. Átlagsebessége kb. 3 km/s, és a 100-200 km-nél közelebbi szeizmogramok domináns fázisa lehet.

A dolgozatban az események időbeli eloszlásán, a hullámformák hasonlóságán és a spektrumok jellegzetességein alapuló elkülönítési módszerek alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

A vizsgált bányarobbantások

A PSZ szeizmológiai állomás 8 magyarországi és dél-szlovákiai kőbánya robbantásait detektálja rendszeresen. Elhelyezkedésük a 3. ábrán látható.

Ezek sorrendben:

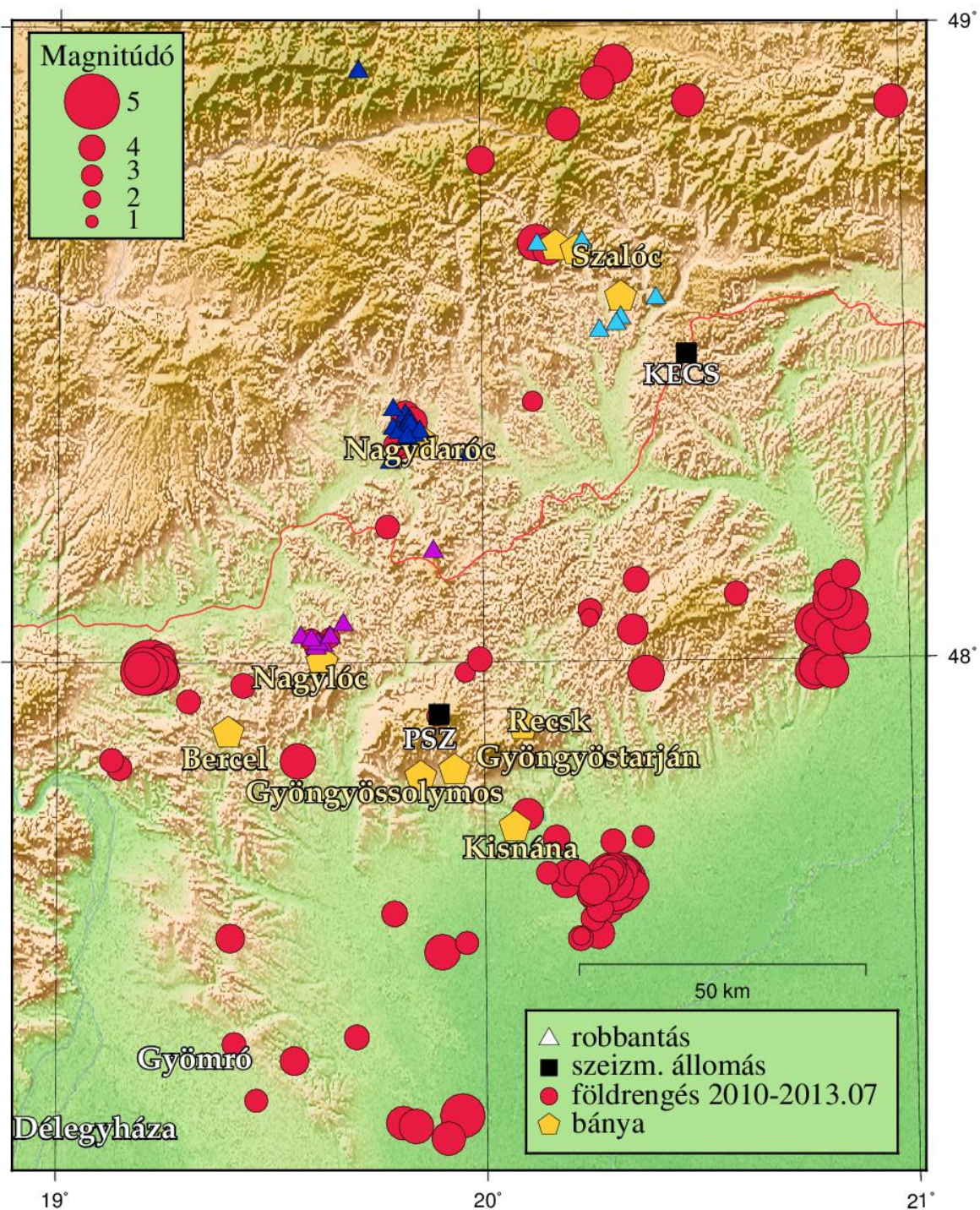
1. Berceli Nógrádkövesd andezit bánya
2. Gyöngyössolymosi Cserkő andezit bánya
3. Gyöngyöstarjáni Füledugó andezit bánya
4. Kisnánai andezit bánya
5. Nagylóci Zsunyi-hegy andezit bánya
6. Recski Csákánykő andezit bánya
7. Szlovákiai nagydaróci bánya
8. Szlovákiai szalóci bányák

A bányák robbantásait, illetve hogy mely bányák érintettek, több hónapos munka révén sikerült kideríteni. A robbantási időpontokat a budapesti és miskolci bányakapitányságok segítségével sikerült megkapnunk. A kapitányságok általában napra pontosan, néhány bánya

esetében óra/perc pontossággal őrzik az időpontokat. Néhány bánya esetében – ahol ritkábban robbantanak – igyekeztünk évekre visszamenőleg megtudni a robbantási időpontokat, hogy minél több eseményt sikerüljön egy-egy adott bányához kapcsolni.

A bányák és az elemzésbe bevont robbantások adatait, a koordinátákat, a bányák PSZ állomástól való távolságát az I. Táblázat tartalmazza. A B jel a sorszám előtt az angol 'blast' robbantás szóra utal. A táblázatban csak abban az esetben adtuk meg a hipocentrumot, ha sikerült azokat a fázisok beérkezési időiből meghatározni. A többi esetben kizárólag a bányakapitányság listája alapján történt a besorolás. A robbantások mérete (lokális magnitúdó) M_L 0,6–2,4 közötti tartományra terjedt ki, fészekmélységük 30 esetben 0 km-nek, 6 esetben 10 km-nek, illetve egyszer 20 km-nek adódott.

A robbantások során felhasznált robbanóanyag tömege 1-5 tonna között változott.



3. ábra. A 2010-2013.07 között regisztrált földrengések és bányarobbantások epicentrumai, és az érintett bányák elhelyezkedése

Figure 3. The epicenter map of earthquakes registered between 2010-2013.07 and the quarry blasts and the location of affected mines

A gyöngyössolymosi, gyöngyöstarjáni, kismánai és berceli bánya robbantásait csak a PSZ állomás regisztrálta, így nem lehetett az epicentrumot meghatározni, mivel ahhoz

legalább 3 állomás beérkezési időpontjaira lett volna szükség. Tisztázva eredetüket, az összehasonlító elemzésbe viszont be tudtuk vonni őket. A *gyöngyöstarjáni* robbantások közül a B17 kiemelten szerepel az I. Táblázatban, mivel korábban – a földrengésekhez hasonló jellege miatt – földrengésként szerepelt a katalógusban. Később a bánya robbantási listája alapján a robbantásokhoz került.

A Szlovákia területén működő *nagydaróci* és *szalóci* bányák esetében az ottani jelentések robbantásnak jelölték az I. Táblázatban felsorolt eseményeket. Mivel több állomás is detektálta őket, helyüket a beérkezett fázisok ideje alapján számítottuk. Ahogy ez a 3. ábrán is látható, a kapott koordináták nem egyeztek meg pontosan a bányákéval, de kisebb-nagyobb szórással azok környezetére estek.

A 2011 végén bezárt *nagylóci* bánya közelébe eső 9 esemény közül 4-et igazolt vissza a bányát működtető társaság, de jelezték, hogy nem teljes és pontos a listájuk. A többi 5 esemény eredete kérdéses. Lehet, hogy robbantások voltak ezek is, amik kimaradtak a bánya listájából, az analízis során ennek az eldöntése is célunk volt.

A *recski* bánya robbantásainak detektálására csak 2013 során derült fény. Ekkor több robbantásos jellegű eseményt is regisztráltunk a PSZ állomáson, amik nem szerepeltek a már felsorolt bányák listáján. Közöttük egy rendkívül nagy is volt, amit visszaigazolt a recski bánya robbantómestere. A B96 sorszámú esemény korábban is robbantásként szerepelt a katalógusban, de nem sikerült egyik bányához sem kötni azt. A B98 esemény pedig tévesen földrengésként szerepelt a havi jelentésben. 2013-ban a recski robbantómester listája révén sikerült őket beazonosítani.

I. Táblázat. A bányarobbantások adatai. Ahol hiányoznak a hipocentrum koordináták, ott csak a Bányakapitányság jelentése alapján történt a besorolás

Table I. The parameters of blasts. Where the hypocenter coordinates are missed, the classification was made by the report of the Mining offices only

BÁNYÁK	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M _L	Megjegyzés
Gyöngyös- solymos $\varphi=47,836^\circ$; $\lambda=19,934^\circ$ 10km-re PSZ-től	B1	2012.05.10	06:10:00			-	-	
	B2	2012.07.02	07:02:00			-	-	
	B3	2012.08.14	07:56:00			-	-	
	B4	2012.09.06	07:00:00			-	-	
	B5	2012.11.29	08:30:00			-	-	
	B6	2013.04.08	08:00:00			-	-	
	B7	2013.05.16	07:35:00			-	-	
	B8	2013.06.17	06:20:00			-	-	
	B9	2013.06.21	07:30:00			-	-	
	B10	2013.06.28	08:00:00			-	-	
	B11	2013.07.01	07:20:00			-	-	
	B12	2013.07.09	06:40:00			-	-	
Gyöngyös- tarján $\varphi=47,822^\circ$; $\lambda=19,857^\circ$ 11km-re PSZ-től	B13	2007.01.20	12:04:00			-	-	
	B14	2007.06.20	10:22:00			-	-	
	B15	2007.10.18	10:26:00			-	-	
	B16	2007.10.20	11:57:00			-	-	
	B17	2008.04.01	10:09:41	47,94	19,80	20	1,5	Mátraverebély
	B18	2011.04.14	08:56:00			-	-	
	B19	2012.06.04	09:49:00			-	-	
	B20	2012.06.08	10:36:00			-	-	
	B21	2013.02.28	11:37:00			-	-	
Kisnána $\varphi=47,741^\circ$; $\lambda=20,070^\circ$	B22	2007.10.20	10:16:00			-	-	
	B23	2011.05.18	14:49:00			-	-	
	B24	2011.05.30	10:25:00			-	-	
	B25	2011.06.15	12:18:00			-	-	

20km-re PSZ-től	B26	2011.07.23	10:21:00			-	-	
	B27	2011.08.11	11:50:00			-	-	
	B28	2011.08.19	09:43:00			-	-	
	B29	2011.08.26	09:30:00			-	-	
	B30	2011.09.01	12:15:00			-	-	
	B31	2011.10.20	11:30:00			-	-	
	B32	2011.11.25	10:44:00			-	-	
	B33	2012.02.27	15:02:00			-	-	
	B34	2012.05.10	12:03:00			-	-	
	B35	2012.05.17	12:44:00			-	-	
	B36	2012.05.25	10:15:00			-	-	
	B37	2012.06.11	12:34:00			-	-	
	B38	2012.06.21	12:14:00			-	-	
	B39	2012.07.12	10:05:00			-	-	
	B40	2012.07.17	09:32:00			-	-	
	B41	2012.07.30	10:38:00			-	-	
	B42	2013.02.25	15:40:00			-	-	
	B43	2013.03.13	09:40:00			-	-	
	B44	2013.03.26	13:37:00			-	-	
	B45	2013.04.10	11:21:00			-	-	
	B46	2013.05.14	13:30:00			-	-	
	B47	2013.05.27	14:37:00			-	-	
	B48	2013.06.05	11:55:00			-	-	
	B49	2013.06.13	08:00:00			-	-	
	B50	2013.06.22	10:20:00			-	-	
Bercel $\varphi=47,893^\circ$; $\lambda=19,406^\circ$ 37km-re PSZ-től	B51	2012.05.17	10:35:00			-	-	
	B52	2012.05.24	09:30:00			-	-	
	B53	2012.06.29	09:15:00			-	-	
	B54	2012.07.16	09:36:00			-	-	
	B55	2012.08.02	10:23:00			-	-	
	B56	2012.09.20	11:00:00			-	-	
	B57	2013.06.05	10:20:00			-	-	
	B58	2013.07.15	10:18:00			-	-	
Nagydaróc $\varphi=48,346^\circ$; $\lambda=19,858^\circ$ 49km-re PSZ-től	B59	2010.04.19	10:36:22	48,37	19,83	0	2,0	
	B60	2010.04.30	12:43:07	48,32	19,78	0	1,7	
	B61	2010.07.02	08:10:24	48,33	19,97	0	1,4	
	B62	2010.08.31	09:15:00	48,36	19,81	0	1,8	
	B63	2010.10.04	09:37:59	48,37	19,79	0	1,9	
	B64	2010.11.15	09:38:48	48,36	19,80	0	1,7	
	B65	2011.03.03	08:49:15	48,39	19,82	7	1,7	
	B66	2011.03.17	10:50:27	48,38	19,82	0	1,8	
	B67	2011.05.20	13:22:23	48,35	19,82	0	2	
	B68	2011.06.03	07:48:31	48,36	19,84	0	1,5	
	B69	2011.06.16	08:32:26	48,38	19,82	0	2,0	
	B70	2011.06.21	07:51:48	48,40	19,80	0	1,1	
	B71	2011.07.06	09:38:28	48,93	20,71	7	1,9	
	B72	2011.08.03	07:58:45	48,38	19,83	0	1,9	
	B73	2011.10.12	08:48:43	48,37	19,83	0	2,2	
	B74	2011.12.09	12:48:11	48,36	19,85	0	2,3	
	B75	2012.02.01	10:00:49	48,36	19,82	0	2,0	
	B76	2012.07.13	08:17:00	48,34	19,85	-	-	
	B77	2012.10.11	07:55:00	-	-	-	-	
	B78	2013.06.03	12:30:33	48,375	19,83	0,0	1,8	Nagydaróc reng
	B79	2013.06.22	10:09:00	-	-	-	-	
Szalóc $\varphi=48,573^\circ$; $\lambda=20,331^\circ$	B80	2010.11.05	10:05:03	48,52	20,28	0	1,6	
	B81	2011.04.14	10:41:26	48,54	20,33	0	1,7	
	B82	2011.08.04	08:52:52	48,57	20,42	0	1,5	
	B83	2012.02.11	12:29:15	48,66	20,13	1	2,4	

83km-re PSZ-től	B84	2012.05.18	12:20:32	48,53	20,32	0	1,6	
	B85	2012.06.30	09:57:30	48,659	20,24	0	1,5	
	B86	2013.06.03	09:00:30	48,620	20,56	0	1,5	zajos
Nagylóc környéki események $\varphi=48,005^\circ$; $\lambda=19,627^\circ$ 22km-re PSZ-től	B87	2011.02.14	10:28:38	48,03	19,62	0	1,1	Nagylóc robb.
	B88	2011.03.05	14:31:44	48,02	19,60	10	1,1	Nagylóc
	B89	2011.03.21	10:27:28	48,03	19,61	0	0,9	Nagylóc
	B90	2011.04.22	17:07:35	48,06	19,67	0	1,7	Sóshartyán
	B91	2011.06.09	08:53:29	48,04	19,57	0	0,6	Nagylóc
	B92	2011.09.26	11:30:13	48,04	19,64	0	1,9	Sóshartyán robb.
	B93	2011.12.04	09:19:33	48,18	19,88	0	1,2	Salgóháza robb.
	B94	2011.12.28	09:20:30	48,04	19,60	10	1	Nagylóc robb.
	B95	2011.12.29	09:07:06	48,04	19,64	8	0,9	Sóshartyán
Recsk $\varphi=47,90^\circ$; $\lambda=20,09^\circ$ 15km-re PSZ-től	B96	2011.11.25	12:18:10	47,980	19,91	0,0	1,1	Szuha robb.
	B97	2013.05.27	08:00:00	-	-	-	-	szónikus jel
	B98	2013.06.06	10:21:15	47,986	19,99	0,0	1,6	Mátraballa
	B99	2013.07.12	05:40:00	-	-	-	-	
	B100	2013.07.18	06:00:00	-	-	-	-	

A vizsgált földrengések

Az elemzést a 3. ábrán látható területen 2010.01.01 és 2013.07.31 között kipattant, és epicentrum adattal rendelkező összes földrengéssel végeztük (Gráczer et al. 2012, 2013; Tóth et al. 2011, 2012, 2013). Összesen 104 földrengés került a listára, melyek paramétereit a II. Táblázatban közöltük. A sorszám előtti EQ jel az 'earthquake' angol földrengés szóra utal. A rengések távolsága a PSZ állomástól 7 és 117 km között, méretük pedig $M_L 0,7-4,8$ között változott. A robbantások előző fejezetben megadott $M_L 0,6-2,4$ mérettartományába több mint 80 földrengés esett. Közülük 9 érezhető volt, és ezekből 3 kisebb károkat okozott az epicentrum közvetlen közelében. EMS skála (European Macroseismic Scale) szerinti besorolásuk a II. táblázatban, a helységnév mellett látható. Néhány, a földrengések között felsorolt esemény esetén (EQ97, EQ101-102) hiányoznak az epicentrum adatok, mivel ezeket kevés állomás detektálta. Hullámformáik viszont nagyon hasonlítottak a korábbi eseményekhez, ezért bevettük őket az elemzésbe, remélve hogy sikerül bizonyítani, hogy valamelyik utóregés csoporthoz tartoznak. Az EQ25 eseményről a korrelációs vizsgálat során derült ki, hogy robbantás, ezt kiemelten jelöltük a II Táblázatban.

II. Táblázat. A földrengések hipocentrum adatai és távolságuk a PSZ állomástól. Ahol hiányoznak a koordináták, ott a kevés adat miatt nem történt epicentrum meghatározás

Table II. The hypocenter data of earthquakes, and the distances from PSZ station. Where the coordinates are missed, the determination of epicenter was not made because of few data

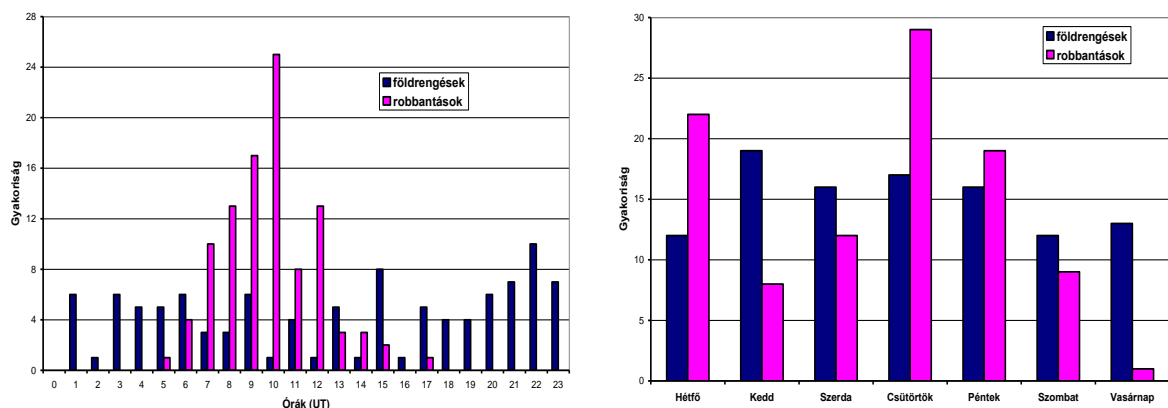
N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnév	táv. (km)
EQ1	2010.05.25	06:55:26	47,286	19,943	15,0	3,1	Újszilvás (EMS5)	70,4
EQ2	2010.07.23	07:01:37	47,984	19,956	10,0	0,9	Mátramindszent	8,6
EQ3	2010.08.14	06:57:26	47,988	20,802	3,3	2,7	Miskolc (EMS3-4)	68,2
EQ4	2010.08.14	22:12:43	48,047	20,781	10,0	1,9	Miskolctapolca	67,6
EQ5	2010.08.17	05:32:43	47,994	20,783	10,0	2,4	Miskolc (EMS4)	68
EQ6	2010.08.19	01:29:05	48,055	20,782	10,0	3,0	Miskolc (EMS4-5)	68
EQ7	2010.08.19	14:48:07	48,041	20,796	1,8	2,4	Miskolc (EMS4-5)	68,7
EQ8	2010.08.19	17:45:32	48,054	20,786	10,0	2,1	Szirna	68,3
EQ9	2010.08.19	22:24:21	47,996	20,785	10,0	2,1	Bükkaranyos	67
EQ10	2010.08.20	11:39:26	47,979	20,772	10,0	2,3	Bükkaranyos	66

EQ11	2010.08.20	16:06:55	47,985	20,781	10,0	2,3	Bükkaranyos	67
EQ12	2010.08.20	19:17:32	48,027	20,847	2,6	1,6	Kistokaj	72
EQ13	2010.08.21	04:58:48	48,032	20,82	3,5	2,4	Kistokaj	70
EQ14	2010.08.21	11:18:32	47,979	20,816	10,0	2,1	Kistokaj	70
EQ15	2010.09.26	05:02:15	48,049	20,350	7,0	1,8	Bélapátfalva	69
EQ16	2010.12.14	17:38:17	48,035	20,864	0,6	2,5	Sajópetri	53
EQ17	2010.12.14	21:29:03	48,075	20,855	1,3	2,8	Felsőzsolca EMS4-5	74
EQ18	2010.12.14	21:32:48	48,114	20,816	2,4	2,0	Felsőzsolca	72
EQ19	2010.12.14	23:07:23	48,092	20,821	1,6	2,6	Szirma	72
EQ20	2011.02.20	08:53:58	47,834	19,145	10,0	1,3	Szirma	57
EQ21	2011.03.12	05:47:01	47,566	19,404	10,0	1,7	Isaszeg	53,7
EQ22	2011.05.20	09:08:09	47,544	19,899	10,0	2,3	Jászdózsa EMS3	41,7
EQ23	2011.06.06	21:55:08	48,128	20,359	10,0	1,4	Bükkmogyorósd	41,8
EQ24	2011.06.18	03:47:34	47,604	19,788	10,0	1,4	Jászágó	35,8
EQ25	2011.07.26	05:52:26	47,915	19,887	5,0	0,8	Mátrászentimre	0,6
EQ26	2011.09.07	22:38:20	47,845	19,563	1,0	2,3	EMS4 Kisbágyon	26,1
EQ27	2011.10.28	09:25:54	47,978	19,990	2,0	1,3	Mátraterenye	11,9
EQ28	2011.11.03	03:29:28	47,399	19,413	7,0	1,2	Péteri	30,8
EQ29	2011.11.27	06:54:33	47,939	19,307	1,0	1,2	Kisecset	44
EQ30	2012.02.01	09:42:22	47,250	19,906	8,0	2,1	Újszilvás	74
EQ31	2012.03.20	01:21:22	47,980	20,380	4,0	2,4	Felsőtárkány	36,6
EQ32	2012.03.23	15:40:43	48,646	20,164	8,0	1,9	Szlovákia	83,3
EQ33	2012.05.31	21:35:42	48,944	20,315	0,0	2,6	Szlovákia	118
EQ34	2012.06.01	03:47:40	48,910	20,280	1,0	2,1	Szlovákia	114
EQ35	2012.06.14	08:13:46	48,075	20,250	8,0	1,2	Bekölce	31,7
EQ36	2012.06.21	20:32:03	48,79	20,00	15,0	1,6	Szlovákia	97,5
EQ37	2012.07.08	18:46:26	47,410	19,698	10,0	1,3	Nagykátá	70,4
EQ38	2012.07.16	09:36:37	47,964	19,435	14,0	1,3	Terény	8,6
EQ39	2012.07.17	15:12:26	48,068	20,249	10,0	0,7	Egercsehi	68,2
EQ40	2012.07.19	09:22:43	48,881	20,497	7,0	2,0	Szlovákia	67,6
EQ41	2012.08.09	04:35:43	47,373	19,553	14,0	1,7	Gomba	68
EQ42	2012.10.29	08:34:05	47,760	20,100	10,0	1,9	Detk	23
EQ43	2013.02.05	22:34:31	47,275	19,805	6,0	2,1	Tápiószőlős	72
EQ44	2013.02.09	01:13:12	47,311	19,465	10,0	1,1	Monorierdő	75
EQ45	2013.02.11	06:08:21	47,270	19,835	6,0	2,2	Tápiószőlős	72
EQ46	2013.02.16	17:18:42	47,643	20,269	10,0	3,6	Heves (EMS4-5)	42
EQ47	2013.02.17	13:21:48	47,647	20,300	1,0	2,5	Tenk	43
EQ48	2013.03.19	15:09:26	48,342	19,806	9,0	1,6	Szlovákia	47
EQ49	2013.03.20	23:48:46	48,097	20,82	10,0	1,7	Szirma	71
EQ50	2013.03.21	11:17:04	48,342	19,795	10,0	1,2	Szlovákia	47
EQ51	2013.04.22	22:28:47	47,650	20,302	10,0	4,8	Heves (EMS6)	44
EQ52	2013.04.22	22:33:48	47,650	20,187	10,0	1,7	Boconád	37
EQ53	2013.04.22	22:37:12	47,667	20,188	17,0	1,4	Tarnaszárd	45
EQ54	2013.04.22	23:01:43	47,617	20,285	10,0	2,1	Heves	45
EQ55	2013.04.22	23:24:24	47,673	20,304	5,0	2,2	Heves	44
EQ56	2013.04.23	03:30:41	47,667	20,309	10,0	1,6	Erdőtelek	42
EQ57	2013.04.23	04:23:49	47,667	20,214	10,0	1,5	Boconád	37
EQ58	2013.04.23	13:31:04	47,667	20,291	14,0	1,8	Erdőtelek	37
EQ59	2013.04.24	01:09:25	47,667	20,333	10,0	1,4	Tenk	40
EQ60	2013.04.24	01:40:07	47,667	20,146	10,0	1,1	Tanaméra	34
EQ61	2013.04.24	03:39:37	47,636	20,304	3,0	2,5	Heves	78
EQ62	2013.04.24	10:05:14	48,846	20,198	2,0	2,1	Szlovákia	26,1
EQ63	2013.04.24	15:53:58	47,667	20,318	10,0	1,9	Erdőtelek	26,1
EQ64	2013.04.24	21:02:37	47,595	20,250	6,0	1,3	Heves	40
EQ65	2013.04.24	22:39:36	47,571	20,264	10,0	1,8	Heves	48
EQ66	2013.04.24	23:02:15	47,558	19,956	0,0	1,1	Jászdózsa	40
EQ67	2013.04.25	13:42:31	47,667	20,324	10,0	1,8	Tenk	43
EQ68	2013.04.26	09:14:19	47,667	20,323	10,0	2,0	Tenk	42

EQ69	2013.04.26	18:57:23	47,610	20,267	6,0	1,5	Heves	44
EQ70	2013.04.27	04:58:50	47,564	20,221	4,0	1,3	Jászszenandrás	46
EQ71	2013.04.28	07:01:37	47,721	20,167	10,0	1,5	Nagyút	30
EQ72	2013.04.29	13:58:04	47,667	20,304	10,0	2,0	Erdőtelek	42
EQ73	2013.05.02	20:06:53	47,723	20,369	1,0	1,0	Füzesabony	42
EQ74	2013.05.03	17:52:38	47,67	20,317	10,0	1,3	Erdőtelek	42
EQ75	2013.05.05	20:58:49	47,716	20,299	4,0	1,3	Kál	38
EQ76	2013.05.05	23:15:31	47,649	20,251	4,0	1,0	Boconád	40
EQ77	2013.05.08	20:49:15	47,647	20,347	13,0	1,7	Tenk	45
EQ78	2013.05.09	01:42:19	47,669	20,327	10,0	1,2	Tenk	43
EQ79	2013.05.12	07:47:23	47,567	20,222	1,0	0,7	Jászszenandrás	46
EQ80	2013.05.12	21:10:47	47,639	20,248	6,0	1,1	Heves	41
EQ81	2013.05.17	04:23:21	47,675	20,298	16,0	1,7	Erdőtelek	41
EQ82	2013.05.18	20:34:20	47,654	20,296	10,0	2,9	Erdőtelek (EMS4-5)	42
EQ83	2013.05.18	22:25:17	48,123	20,852	8,0	1,7	Onga	75
EQ84	2013.05.24	18:54:54	47,663	20,286	0,0	1,8	Erdőtelek (EMS4)	41
EQ85	2013.06.03	21:23:06	47,667	20,289	1,0	2,2	Erdőtelek	41
EQ86	2013.06.05	18:45:46	47,993	19,216	4,0	4,1	Érsekvadk. (EMS5-6)	51
EQ87	2013.06.05	20:46:37	47,980	19,252	6,0	1,7	Szente	48
EQ88	2013.06.05	22:00:56	47,992	19,228	2,0	1,5	Érsekvadkert	51
EQ89	2013.06.11	05:31:25	47,995	19,226	5,0	2,3	Érsekvadk. (EMS4-5)	51
EQ90	2013.06.14	06:35:53	48,009	19,224	10,0	1,5	Csesztve	49
EQ91	2013.06.16	15:10:26	48,00	19,236	5,0	2,0	Csesztve	50
EQ92	2013.06.19	11:22:40	48,213	19,775	4,0	1,2	Szlovákia	34
EQ93	2013.06.22	15:32:37	47,846	19,125	10,0	1,2	Szendehely	58
EQ94	2013.06.23	03:47:21	47,989	19,208	2,0	2,3	Érsekvadkert	52
EQ95	2013.06.23	15:47:52	47,985	19,242	5,0	2,1	Csesztve	49
EQ96	2013.06.24	23:06:40	47,669	20,295	0,0	1,2	Erdőtelek	41
EQ97	2013.07.02	13:49:04	-	-	-	-	Szlovákia	47
EQ98	2013.07.02	17:44:03	47,652	20,274	1,0	1,9	Erdőtelek	41
EQ99	2013.07.02	19:07:32	47,987	19,204	4,0	3,4	Érsekvadkert (EMS5)	41
EQ100	2013.07.02	19:47:00	47,990	19,198	5,0	2,3	Érsekvadkert	41
EQ101	2013.07.04	02:26:52	-	-	-	-	Heves	
EQ102	2013.07.04	15:22:00	-	-	-	-	Heves	
EQ103	2013.07.05	19:34:58	47,633	20,243	1,0	1,3	Heves	41
EQ104	2013.07.11	06:10:21	47,641	20,254	1,0	1,9	Tenk (EMS3)	41

A robbantások és földrengések elkülönítése a keletkezési idők alapján

A 4. ábra a 204 esemény napi- és heti eloszlását mutatja. Megfigyelhető, hogy mind a 8 bánya működése beleesik a 5–15 h (UT) közötti időablakba, egyetlen esemény volt 17 óra után. A robbantások közül 90 munkanapra esett, 10 pedig hétvégére. Érdekes még a hétfői és csütörtöki csúcs, ami talán a bányaművelés ritmusából adódik. Ezzel szemben a földrengések eloszlása sokkal egyenletesebb, nincs kiemelkedő nap vagy napszak. Emiatt, ha hétköznapi munkaidőben észlelt szeizmikus eseményről van szó, gyanítható, hogy az esetleg robbantás. A 2010.01 és 2012.12 közötti 3 év alatt 68 robbantást és 42 rengést tartalmazott a lista. A regisztrált események többsége a területen tehát robbantás volt. (Természetesen több olyan földrengés is keletkezhetett, aminek paramétereit nem sikerült meghatározni, így nincsenek benne a listában.)



4. ábra. A robbantások és földrendések napi és heti eloszlása

Figure 4. The diurnal and weekly distribution of blasts and earthquakes

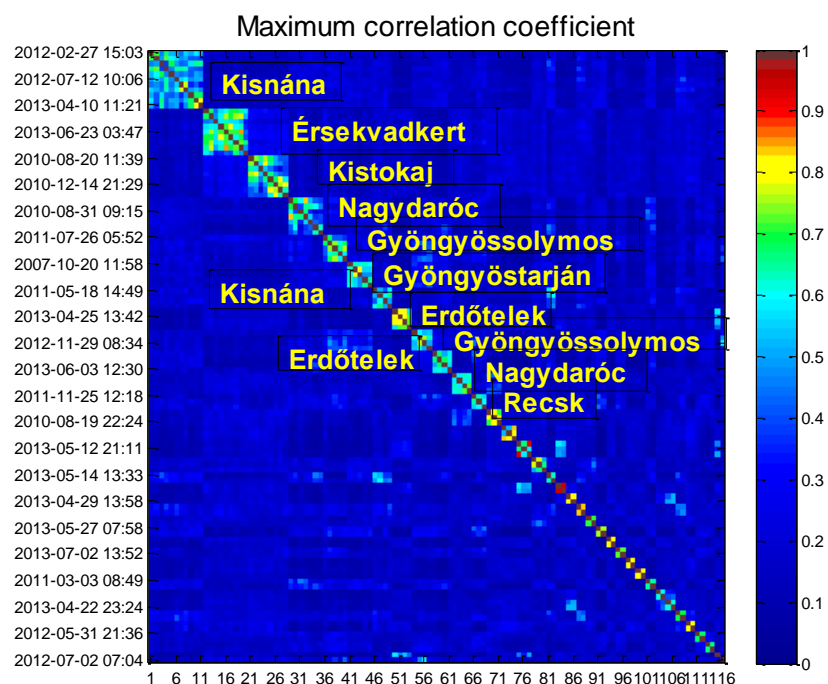
A robbantások és földrendések elkülönítése a hullámformák alapján

A hullámformák összehasonlítását a keresztkorrelációs együtthatók számításával végeztük, amire az ilyen célra kifejlesztett GISMO, MATLAB programcsomagot használtunk. Az elemzésre a horizontális csatornákat választottuk, mert ezeken a később beérkező S hullámok nagyobb amplitúdóval jelentkeztek, ezért használhatóbbak voltak.

Először meghatároztuk azt az időablakot, amin belül összehasonlítottuk a szeizmogramokat. Az SHN (É-D) csatornákból egy-egy 25 másodperces hullámformát használtunk fel, ami a teljes esemény regisztrátumát, az S és Rg hullámvonulat nagy részét is tartalmazta. Ezután a szeizmogramokat 0,5-20 Hz közötti Butterworth sávszűrővel megszürtük, hogy a zavaró kisperiódusú jeleket eltávolítsuk. Két esemény közötti korrelációs együttható meghatározásához eltoltuk egymáshoz képest a szeizmogram párokat, megkerestük a két esemény közötti korrelációs együttható maximális értékét, és ezt minden lehetséges párra elvégeztük.

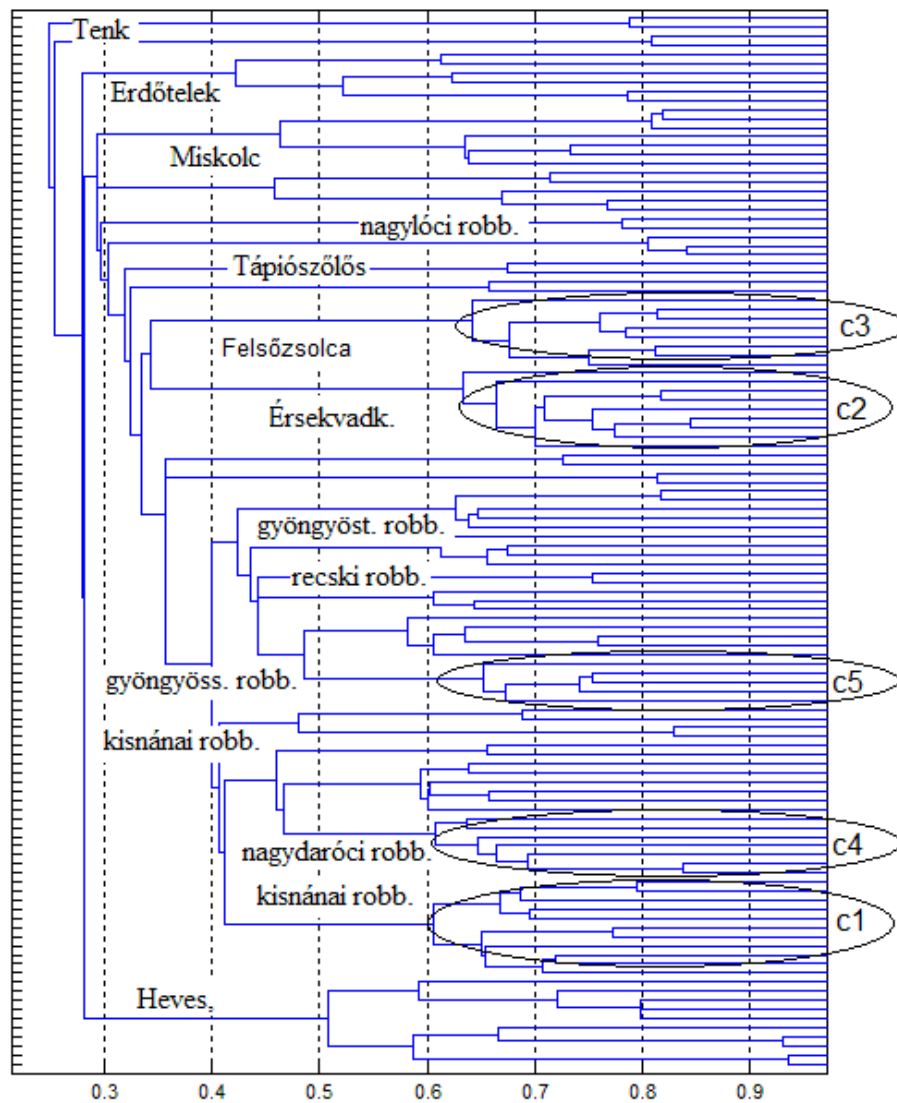
A kritikus korrelációs együttható értékét, ami fölött hasonlónak tekintettünk két eseményt, $c_{xy}=0,6$ -nak választottuk, ami nem túl szigorú feltétel. Ennek alapján összesen 114 esemény mutatott valamely másik eseménnyel a kritikus értéknél ($c_{xy}=0,6$) nagyobb hasonlóságot. Az elemzés végeredményét a rendezett korrelációs mátrix (5. ábra), a hasonlóság alapján „rokonsági” ágakba csoportosított események dendrogramja (6. ábra) mutatja. Az ábrákon összesen 116 esemény szerepel. A legnagyobb hasonlóság alapján négy nagyobb klaszter alakult ki, egy-egy 11, 9, 8 és 7 elemű, valamint két 5 elemű és öt 4 elemű. Ezen kívül öt darab 3 elemű és további tizenhat 2 elemű dublettet kaptunk még.

Az 5 legnagyobb klaszter a 6–11. ábrákon látható. A 11. ábra a gyöngyössolymosi robbantások legnagyobb, 5 elemű klaszterét mutatja, ami azért érdekes, mert egy korábban földrengésnek tekintett esemény (EQ25: 2011.07.26. Mátraszentimre) több 2013-as, igazolt robbantáshoz hasonlít leginkább. Ez az esemény tehát tévesen került a földrengések közé. A recski bányarobbanások 3 elemű klasztere pedig azért tanulságos, mert a B96 sorszámu, 2011.11.25-én végrehajtott, korábban egyik bányához sem köthető robbantás itt két, 2013-as igazolt bányarobbanással került egy csoportba.



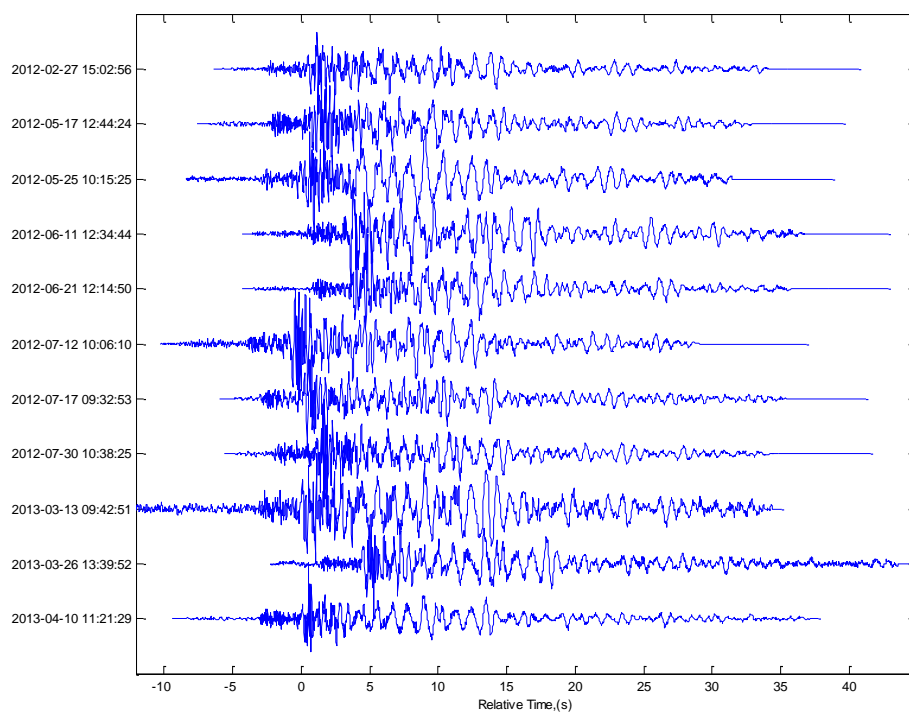
5. ábra. A robbantások és földrengések rendezett korrelációs mátrixa, a nagyobb klaszterek forrásának a feltüntetésével

Figure 5. The arranged correlation matrix of blasts and earthquakes, the origin of biggest clusters were indicated



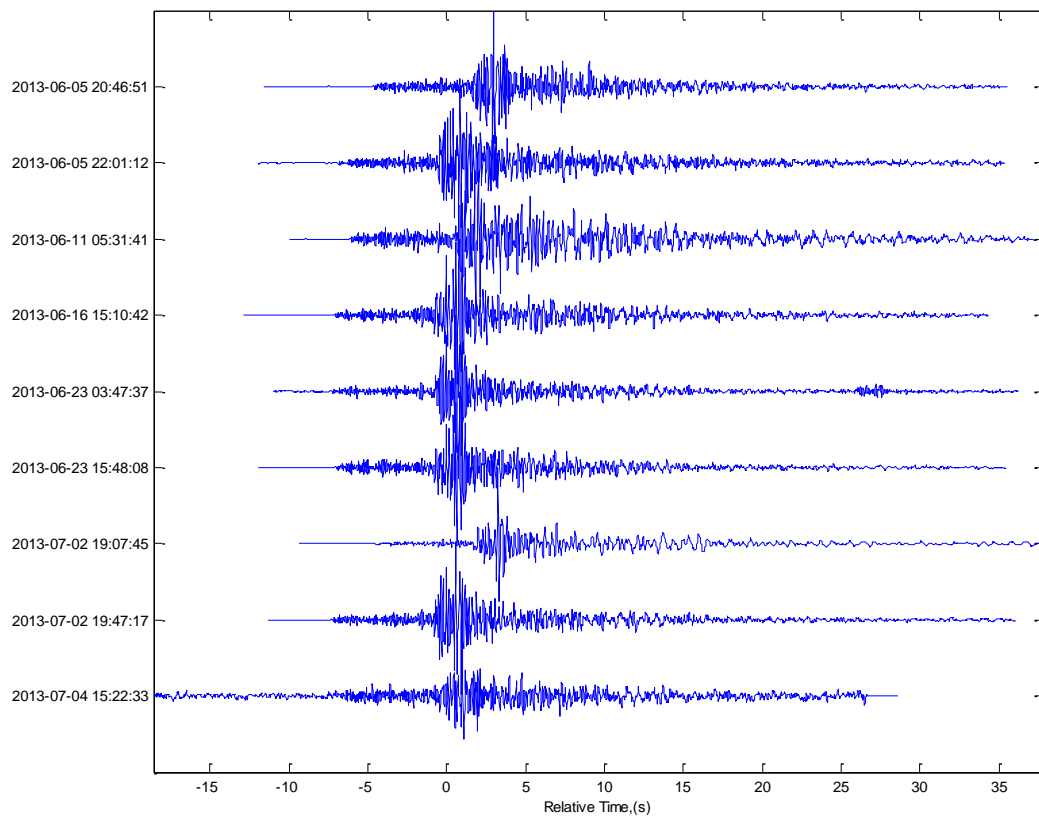
6. ábra. A legalább egy másikkal hasonlóságot mutató ($c_{xy} > 0,6$) események dendrogramja. A jelentősebb klasztereket feliratoztuk

Figure 6. The dendrogram of similar events above the critical correlation coefficient ($c_{xy} > 0.6$). The main cluster are labeled



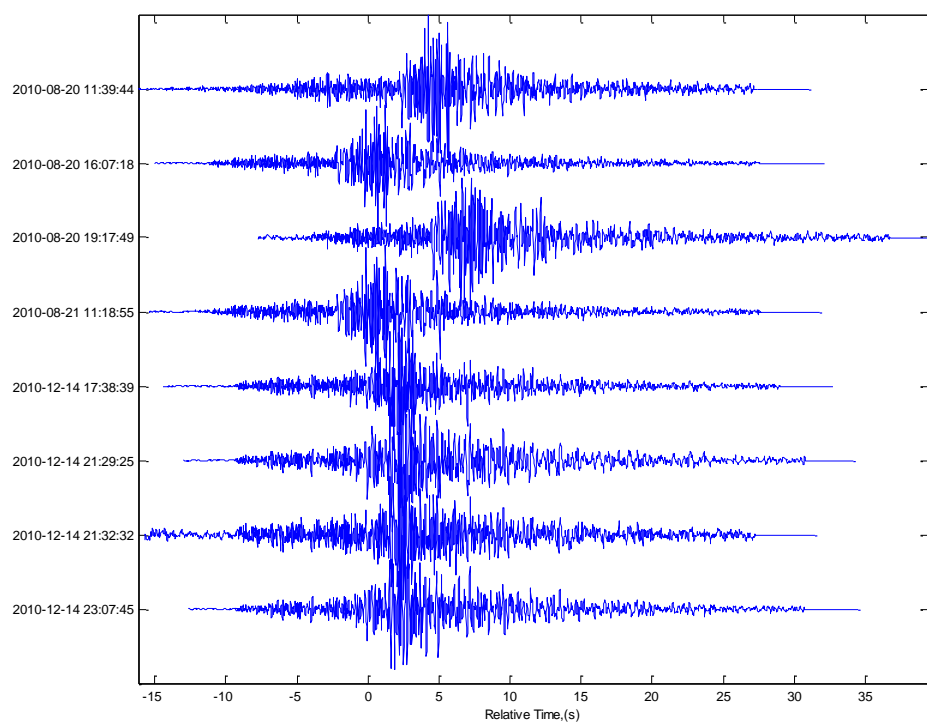
7. ábra. A legnagyobb (11 elemű) klaszter eseményei a *kisnánai* bányá robbantásaiból származtak

Figure 7. The events of the largest cluster (consisting of 11 elements) originated from the blasts of the Kisnána mine



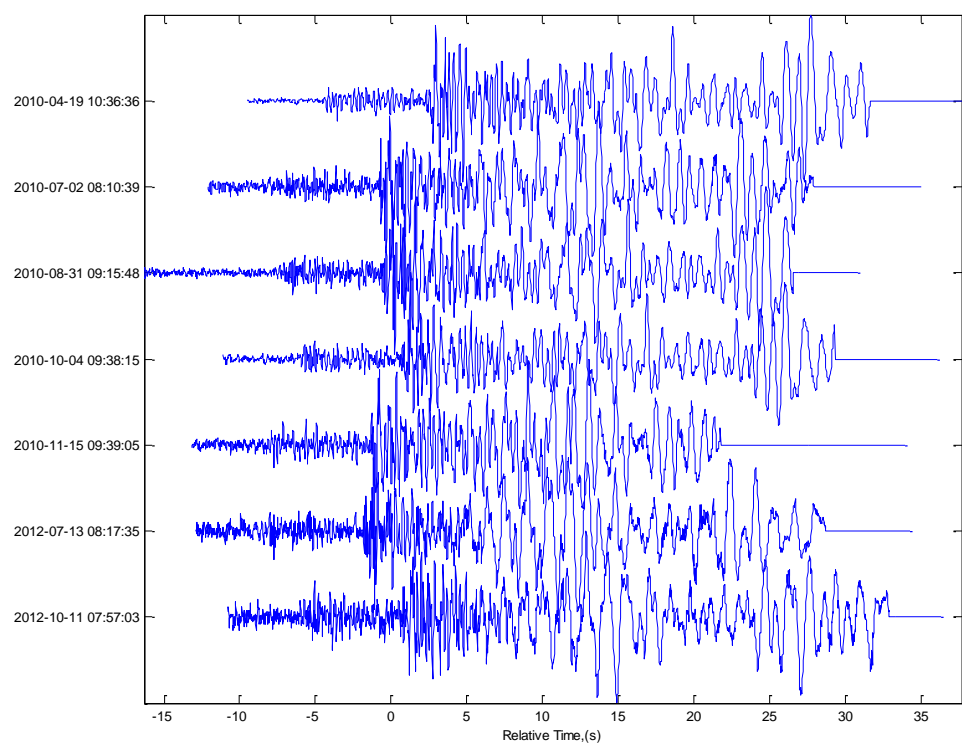
8. ábra. A második legnagyobb (9 elemű) klaszter elemei az Érsekvadkert térségében
kipattant földrengésekhez tartoztak

Figure 8. The second largest cluster (consisting of 9 events), were belonged to earthquakes of
area Érsekvadkert



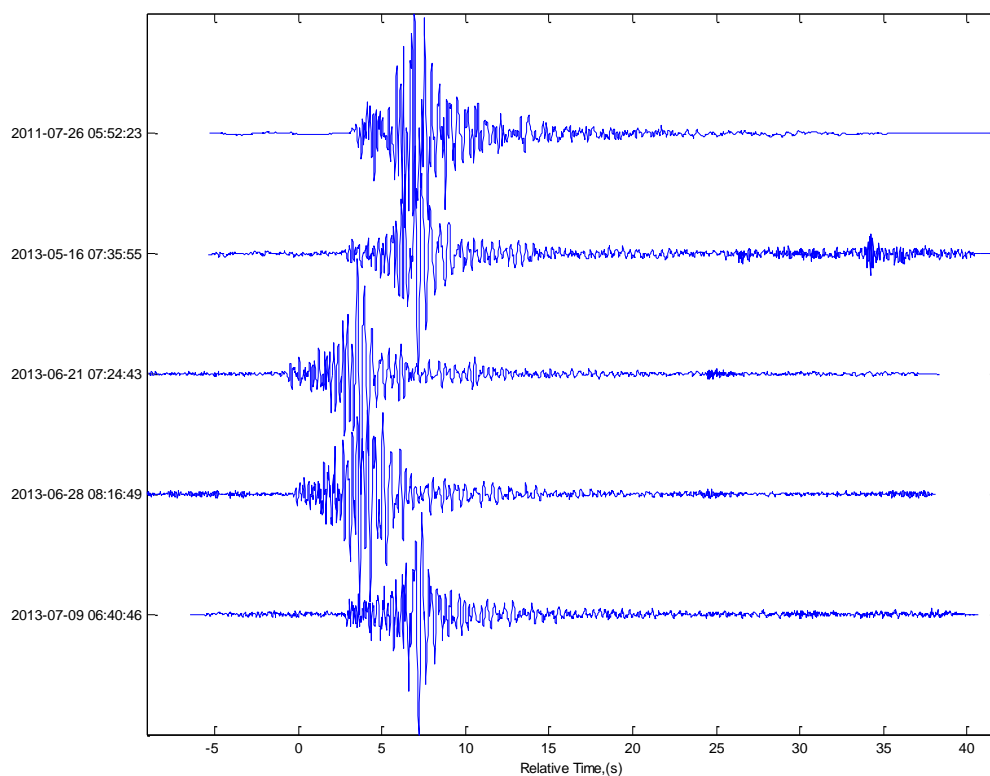
9. ábra. A harmadik legnagyobb (8 elemű) klaszter elemei a Felsőzsolca-Bükkaranyos térség rengései voltak

Figure 9. The third largest cluster consisting of 8 events, were belonged to earthquakes of area Felsőzsolca-Bükkaranyos



10. ábra. A 7 elemű klaszter eseményei *nagydaróci* robbantások voltak

Figure 10. This cluster consisting of 7 events, were belonged to blasts of *Nagydaróc*

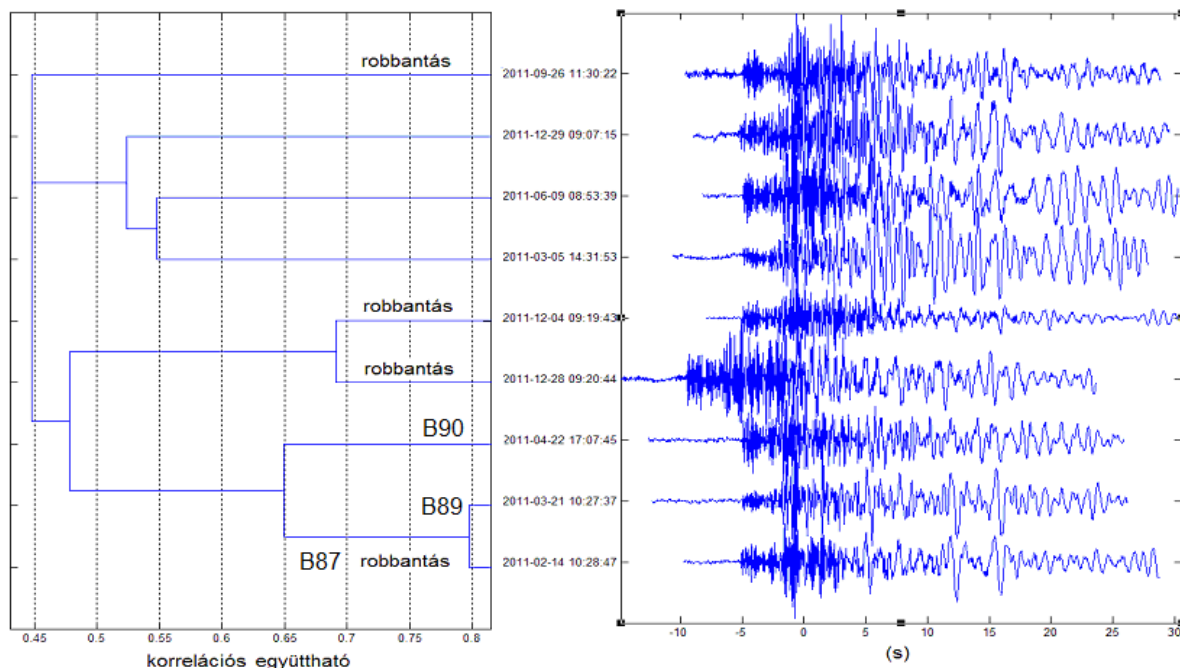


11. ábra. A *gyöngyössolymosi* bányarobbanás klasztere. Az EQ25 sorszámú mátraszentimrei földrengés (2011-07-26) hullámformája e robbantásokkal alkotott közös klasztert

Figure 11. The cluster of explosions of quarry *Gyöngyössolymos*. The waveform of EQ25 earthquake occurred in Mátraszentimre (2011-07-26) formed common cluster with these blasts

Az egyes bányák esetében a robbantások nem mindig alkottak egyetlen csoportot. Például a *kisnánai* robbantások a legnagyobb klaszter (7. ábra) mellett 4 további kisebb csoportba rendeződtek. A *nagydaróci* bánya robbantásai 3, a *gyöngyössolymosi*, *berceli*, *gyöngyöstarjáni* és *recski* robbantások 2-2 klasztert hoztak létre. A *nagylóci* bánya robbantásai közül egy 3 és egy 2 elemű csoport jött létre. A 9 nagylóci esemény hasonlósági dendrogramját és szeizmogramjait a 12. ábra mutatja. Az események közül, azonban csak 4-et igazolt vissza a bánya, ezeket felirattal jelöltük. Az előbbi azért fontos, mert két kérdéses eredetű esemény (B89-B90) igazolt robbantással (B87) mutatott nagy hasonlóságot. Ezért ezek az események robbantásnak tekinthetők. A *szalóci* bányavidék robbantásai nem alkottak egy klasztert sem, tehát egyik robbantás sem hasonlított a másikkra.

A földrengések 17 hasonlósági csoportba rendeződtek, de a robbantásokkal egy esetben sem keveredtek.



12. ábra. A nagylóci bánya robbantásai esetén egy 3 elemű klaszterbe került a kérdéses B89-B90 esemény 1 igazolt robbantással

Figure 12. In the case of mine Nagylóc, the question B89 and B90 events have formed three element cluster with the proven B90 explosion

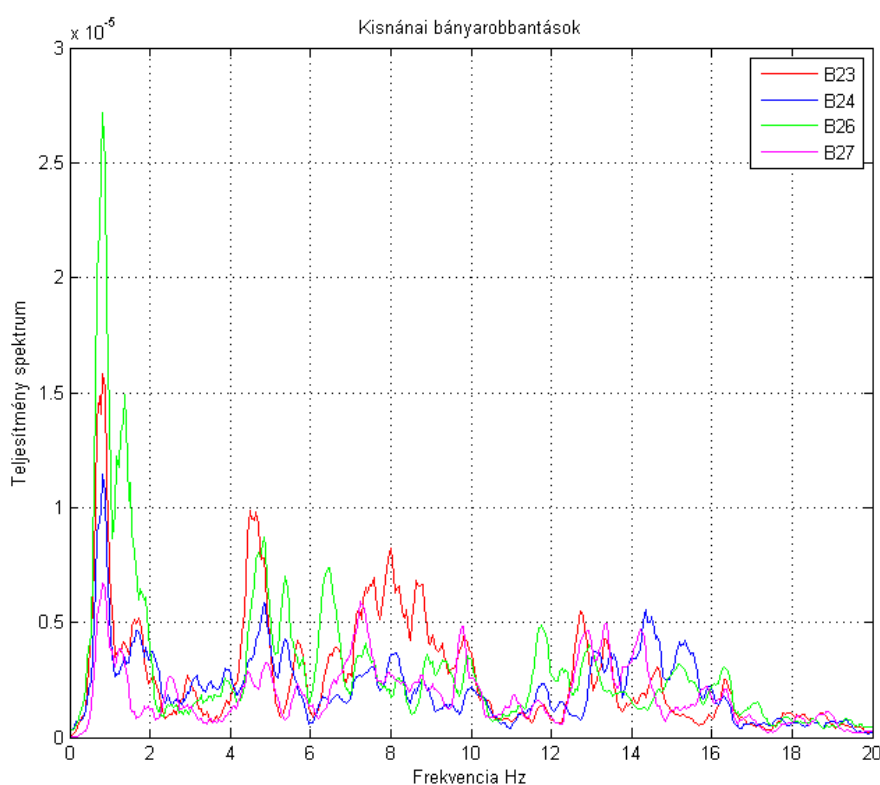
Az I. és II. táblázatban felsorolt 204 esemény közül a $c_{xy}=0,6$ feltétel szerint 114 esemény volt hasonló valamely másik eseményhez, ebből 54 volt földrengés és 60 robbantás, ami a rengések 52, a robbantások 60 %-ának felelt meg. A 28 kishányai robbantás szeizmogramjai közül 21 került bele 5 különböző klaszterbe. A kritikus korrelációs együttható értékét $c_{xy}=0,5$ -re csökkentve még mindig nem keveredtek a robbantások a földrengésekkel. Ekkor a robbantások 84, a rengések 60 %-a került bele különböző csoportokba. A $c_{xy}=0,6$ esetén kialakult klaszterek részben bővültek, részben összeolvadtak. A kishányai 28 robbantás 4 csoportjába most 24 esemény került bele, majdnem az összes robbantás. A földrengések esetében érdekes, hogy ugyanarról a szűk területről több klaszter is kialakult, ezek talán mélységükben, vagy fészekmechanizmusukban térhettek el egymástól.

A robbantások és földrengések spektrumainak jellegzetességei

A vizsgált bányákban a robbantásokat a késleltetett robbantási technikával hajtották végre. Ezzel a módszerrel el lehet érni a kőzettömbök kellő szétzúzását, és csökkenteni a zajt valamint a környező települések megrázottságát, zavarását. E technika lenyomata a spektrumban annak csipkézettsége lesz. A 13. ábrán néhány kishányai bányarobbantás, a 14. ábrán a bukharanyosi, 2010-es évben kipattant néhány földrengés simított spektruma látható. Megfigyelhető mindkét esetben az egyes csoportokhoz tartozó spektrumok hasonlósága, és a robbantásoknál a jellemző csipkézettség. A robbantások esetében, figyelembe véve az összes bányát, a legnagyobb maximum az első csúcsnál, alacsony frekvencián, 4Hz alatt volt tapasztalható. A földrengéseknél a legnagyobb spektrum teljesítmény ennél magasabb

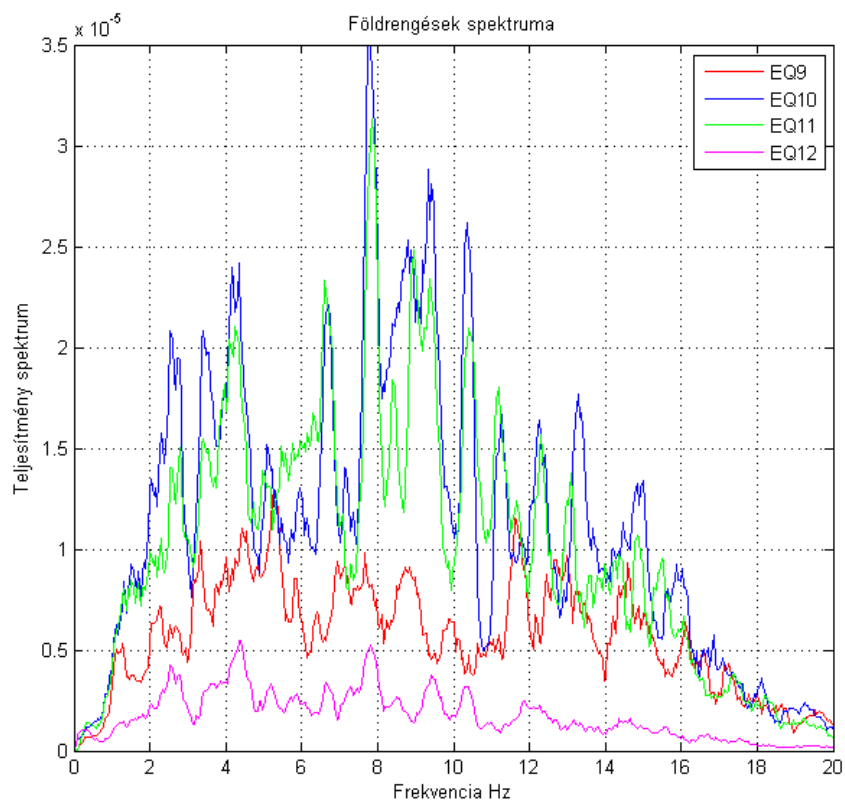
frekvenciához tartozott. Ez a tapasztalat megegyezik pl. Wüster (1993) Németország és Csehország határán (Vogthland) kipattant M_L 1-3 mikrorendések és kémiai robbantások spektrumainak elemzésével. Azt találta, hogy a földrengések esetében az S hullámok spektruma magasabb frekvenciákra terjedt ki, és az 1-10 Hz közötti tartományban a teljesítménye lassabban csökkent, mint a robbantásoké.

A bináris spektrogramok elemzésével az időtől független spektrum modulációk meglétét követtük nyomon. A spektrumot két különböző hosszúságú ablakban futóátlagot számoló szűrővel alakítottuk át binárisra. Ha a rövid átlag értéke nagyobb volt, mint a hosszabbé, a spektrum '1', ha kisebb, '0' értéket kapott. A rövid átlagot 1,17 Hz, a hosszút pedig 3,5 Hz széles frekvencia ablakból számítottuk. A bináris spektrogram számításával, piros/fehér színekkel kódolva a spektrum csipkézettségének időbeli stabilitását követtük nyomon (15. ábra). A vizsgált földrengésekre ez az időtől független moduláció nem volt jellemző, míg 100 robbantás közül csak 7 esetben nem alakult ki.



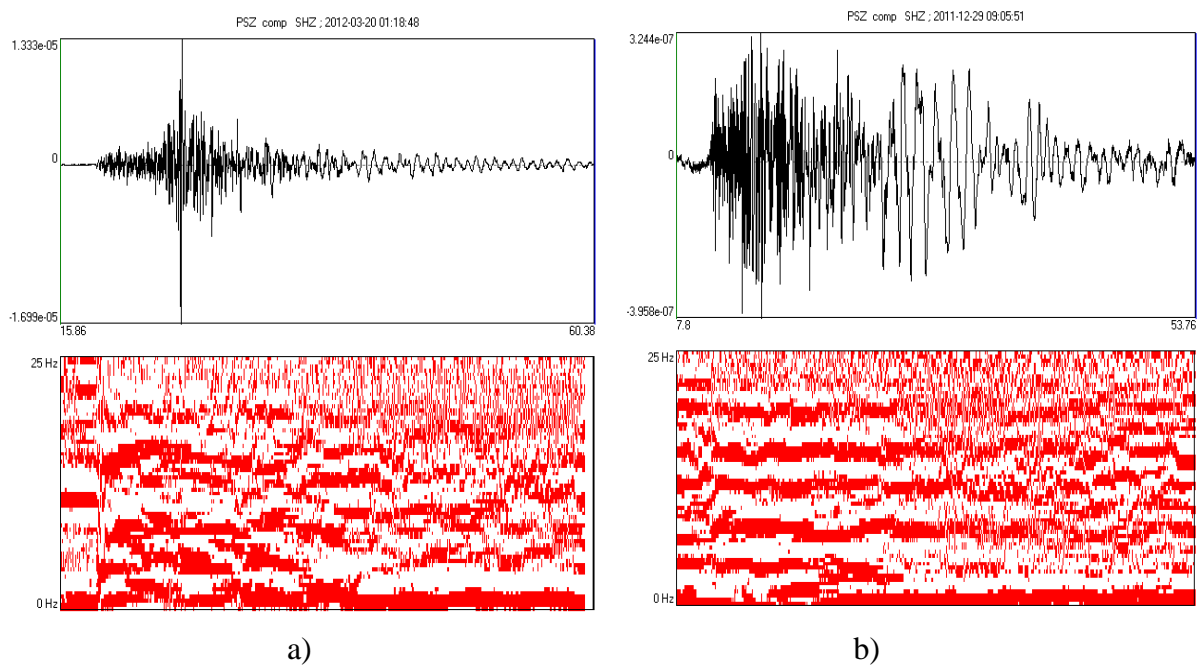
13. ábra. Néhány *kiskővölgyi* robbantás spektruma

Figure 13. Some blasting spectra of *Kiskővölgy*



14. ábra. Néhány földrengés spektruma

Figure 14. Some earthquake spectra



15. ábra. Földrengés a) és robbantás b) tipikus bináris spektruma

Figure 15. Typical binary spectra of a) blast and b) earthquake

Következtetések

A szeizmicitásról alkotott kép kialakítása és a tektonikai értelmezés szempontjából hazánkban is nagyon fontos, hogy el tudjuk különíteni a mikrorengéseket és a kémiai bányarobbantásokat. A dolgozatban a Mátra-hegység második legmagasabb csúcsán elhelyezett piszkéstetői PSZ állomáson detektált 8 különböző bánya robbantásainak és a terület földrengéseinek az időbeli eloszlását, hullámforma hasonlóságát és spektrum jellemzőit vizsgáltuk.

A legkézenfekvőbb elkülönítő módszer az esemény helyét és idejét használja fel. Mivel az epicentrumok meghatározási pontossága több vizsgált robbantás esetében az 5-10 km-t is meghaladta, csak az epicentrum alapján nem lehetett kiválogatni őket.

A bányák esetében ki tudtunk jelölni egy időablakot, amikor általában a robbantások történtek. De ebben az időablakban történtek földrengések is. A hétköznapi-hétféle felosztás sem ad egyértelmű minősítést, mert a rengések 76%-a is hétköznapra esett.

A hullámformák hasonlóságának elemzésétől azt vártuk, hogy az ugyanabból a bányából származó események nagyon hasonlóak lesznek egymáshoz. De annak ellenére, hogy egy adott bánya és regisztráló állomás esetében a robbantás szeizmikus hullámai mindig ugyanazokon a közetrétegeken hatolnak át, nem minden azonos bányából származó robbantás bizonyult egymáshoz hasonlóknak. A robbantások végrehajtása során használt eltérő mennyiségű robbanóanyag és töltet elrendezés ugyanis olyan egyedi hullámformákat hozott létre, ami miatt keresztkorrelációjuk kicsi lett. Mind a robbantások, mind a földrengések több klaszterbe rendeződtek, de a robbantások nem keveredtek össze a földrengésekkel. A különböző bányák robbantásai különböző klaszter(ek)e)t alkottak, ezért ha létrehozuk az egyes bányákhoz tartozó hullámforma adatbázist (folyamatosan bővítve), lehetővé válik a robbantások 100%-os kiszűrése. Ezek megerősítésére azonban nagyon fontosak a bányakapitányságoktól kapott információk is.

A csoportok elemei eltérő magnitúdójú eseményeket tartalmaztak, de a hullámformák hasonlóságára ez nem volt nagy hatással. Pl. a második legnagyobb klaszter legkisebb és legnagyobb eleme $M_L1,6$ illetve $M_L3,4$ méretű földrengés volt. A recski, nagylóci és gyöngyössolymosi robbantások klaszterei esetében korábban földrengésnek tekintett, vagy ismeretlen eredetűnek tekintett robbantást sikerült azonosítani a hullámformák hasonlósága segítségével.

A miskolci, hevesi és érsekivadkerti utórengések is hasonlósági csoportokba rendeződtek. Ezeknek a rengéseknek az epicentrumai nagyon közel (3-4 km) estek egymáshoz, időben pedig maximum néhány hónap különbséggel pattantak ki. Az utórengéseket tartalmazó klaszterek elemeiről elmondhatjuk, hogy hasonló epicentrumú és fészekmechanizmusú eseményekből állnak, ami a tektonikus feszültségek kioldódásának folyamatáról adhat információt.

Olyan földrengés is bekerült a második legnagyobb klaszterbe, aminek hipocentrumát a kevés regisztráló állomás miatt nem sikerült meghatározni (EQ101: 2013-07-04 15:22). Elméleti megfontolások alapján ennek az eseménynek epicentruma és fészekmechanizmusa hasonló a többi, vele egy klaszterbe került, ismert földrengéséhez. Hasonló példa volt még 2012-ben a Vértes hegységben található Gánton, ahol történt egy $M_L2,7$ rengés, amit nagyon sok kisebb utórengés követett. Ezeket csak egyetlen állomás regisztrálta, epicentrumaikra így csak a hullámformák hasonlósága révén lehetett következtetéseket levonni (Kiszely 2013).

A spektrumok elemzése is figyelemre méltó eredményt adott, mivel a legtöbb robbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő csipkézettség. A csipkézettség kb. az 1-10 Hz közötti spektrum tartományra volt leginkább jellemző. Az

egyes frekvenciák teljesítményének megemelkedése a nagyobb frekvenciák felé haladva újra jelentkezett, de egyre kisebb amplitúdóval. Robbantások esetén a teljesítmény spektrumok amplitúdója az első „csipke” miatt az 1-4 Hz közötti sávban volt a legmagasabb. Néhány földrengés esetén is meg lehetett figyelni egyes frekvenciák megemelkedett teljesítményét, de a spektrum szélesebb frekvencia tartományra terjedt ki, mint a robbantások esetében. A magasabb frekvenciák felé haladva gyorsabban csökkent a robbantások teljesítmény spektruma, mint a földrengések esetében.

A legtöbb bányarobbanás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő, időtől független moduláció (100 robbantás közül mindössze 7 esetben nem alakult ki). A bináris spektrogramon az időtől független moduláció az esemény végéig követhető volt, míg a földrengések bináris spektrogramjára nem voltak jellemzőek a „sávos” szakaszok.

Összefoglalásként megállapítható, hogy az aktív vetők kijelölésekor a katalógusban szereplő mikrorengések természetes eredetét ellenőrizni kell, mert ebben a mérettartományban már bányarobbantások is nagyszámmal előfordulnak hazánkban. A robbantások és földrengések elkülönítésére a hullámformák hasonlóságának elemzése jó eredményt adott. A klaszterekbe rendezett események szétváltak egymástól bányák szerint, és különböző rengésrajok szerint is. Vizsgálataink szerint a késleltetett robbantási módszer következtében kialakuló spektrum csipkézettség és a spektrogramon nyomon követhető időtől független moduláció jelenléte jó elkülönítő paraméternek bizonyult. Fontos felvenni a kapcsolatot a területen az érintett bányakapitányságokkal a robbantási időpontok megismerése céljából, és egy több évet átfogó, az egyes bányákra vonatkozó robbantási hullámforma mintát összeállítani.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földrengés Mérnöki Irodának, hogy a 2013-as eseményekre a havi földrengések tájékoztatóit felhasználhattuk az epicentrumok paramétereinek forrásaként.

A cikk a 105399 számú OTKA pályázat keretében végzett kutatás része.

Hivatkozások

- Baisch S., Ceranna L. & Harjes H-P.** (2008): Earthquake Cluster: What can we learn from waveform similarity? *BSSA Vol 98, No. 6, 2806-2814.*
- Baumgardt D. R. & Young G. B.** (1990): Regional seismic waveform discrimination and case-based event identification using regional arrays. *BSSA V. 80 No. 6. 1874-1892.*
- Carr B. D., Carbin H. D.** (1998): Discrimination ripple-Fired explosions with high-frequency (>16Hz) data. *BSSA Vol. 88 No. 4. pp. 963-972.*
- Chapman M. C., Bollinger G. A., Sibol M. S.** (1992): Modeling delay-fired explosion spectra at regional distances. *BSSA V. 82 No. 6. 2430-2447.*
- Gitterman Y, Torild Van Eck** (1993): High-fr spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA V. 83 No. 4. 1184-1212.*

- Deichmann N. & Garcia-Fernandez M.** (1996): Rupture geometry from high-precision relative hypocenter locations of microearthquake clusters. *Geophys. J. Inst.*, 110, 501-517.
- Grácz Z., Czifra T., Kiszely M., Mónus P., Zsíros T.** (2012) Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2011, *Budapest: MTA CSFK GGI*, 2012. 357.
- Grácz Z., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T.** (2013) Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2012, *Budapest: MTA CSFK GGI*, 2012. 258.
- Hage M. & Joswig M.** (2009): Mapping local microseismicity using short-term tripartite small array installations – Case study: Coy region (SE Spain), *Tectonophysics* 471, 225-231.
- Hedlin M. A. H., Minster J. B. & Orcutt J.** (1989): The time-frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosion recorded in Kazakhstan, USSR. *Geophys. J. Int.* (1989) 99, 102-121.
- Kim W. Y., Simpson D. W., Richard P. G.** (1993): Discrimination of regional earthquakes and explosions in eastern United States using high-frequency data. *Geophys. Res.*
- Kiszely M.** (2012) A hullámforma korreláció használata mikrorengek elemzésére – 2012. április 6., Vértess. *Geomatikai közlemények XV*, 2012 119-127 o *Lett.*, Vol. 20 1507-1510.
- Koch K. & Fäh D.** (2002): Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Voghtland area revisited. *Pure appl. Geophys.* 159 (2002) 735-757.
- Massa M., Eva E. & Spallarossa D., Eva C.** (2006): Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology*, no. 10. 1-22.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely. & Czifra T.** (2011): Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2010. MTA GGKI és GeoRisk Kft., *Budapest*, 140 old. *HU ISSN 1589-8326*.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely. & Czifra T.** (2012): Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2011. GeoRisk Kft., *Budapest*, 160 old. *HU ISSN 1589-8326*.
- Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely. & Czifra T.** (2013): Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2012. GeoRisk Kft., *Budapest*, 88 old. *HU ISSN 1589-8326*.
- Wüster J.** (1993): Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe – a case study. *BSSA V. 83 No. 4. pp.* 1184-1212.

Internetes források:

- USGS: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/mineblast/evidence.php> (2013)
- GISMO: <http://giest.alaska.edu/Seis/EQ/tools/matlab>